Beitrag zur Lehre vom optischen Zeitsinn.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt der

medizinischen Fakultät

der

Albert-Ludwigs-Universität

zu

Freiburg im Breisgau

von

Friedrich Pauwels

Medizinal-Praktikant

aus

Aachen.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Freiburg i. B.

Speyer & Kaerner, Universitätsbuchhandlung.

Gedruckt mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der Universität Freiburg in Baden

Dekan: **Geh. Hofrat Prof. Dr. Kraske.**

Referent: **Geh. Rat Prof. Dr. von Kries.**

Druck von A. Bonz' Erben in Stuttgart.

Meinen lieben Eltern.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545315_0138

Beitrag zur Lehre vom optischen Zeitsinn.

Die Zeitbestimmung auf den verschiedenen Sinnesgebieten umfaßt zahlreiche Aufgaben. Eine der einfachsten und am eingehendsten untersuchten ist die Bestimmung der Zeitverhältnisse zwischen zwei momentanen Reizen. Diese können nacheinander dieselben Sinneselemente treffen, sie können verschiedene Elemente desselben Sinnesorganes treffen, sie können analoge Elemente eines paarigen und endlich verschiedene Sinnesorgane treffen.

Betrachten wir zunächst die verschiedenen Möglichkeiten für den Gesichtssinn. Die eben noch wahrnehmbare Zeitdifferenz, die „kleinste Differenz" nach Exner, für Lichteindrücke, welche dieselben Netzhautstellen treffen, beträgt nach Versuchen von Baader[1] bei helladaptiertem Auge, je nach Stärke des einwirkenden Lichtes $^1/_{10}$ bis $^1/_{70}$ sec. Die weiter zurückliegenden Versuche von Exner[2] und Mach[3] ergeben viel größere Werte, ca. $^1/_{24}$ sec. Die Erklärung hierfür ist vielleicht in dem Umstande zu suchen, daß früher, wo das verschiedene Verhalten des hell und dunkel adaptierten Auges nicht genügend bekannt war, meistens im Dunkelzimmer mit künstlichen Lichtquellen gearbeitet wurde. Nach den neueren Versuchen von Cords[4] beträgt die

[1] Nagel, Handbuch der Physiologie III. S. 254.

[2] Pflügers Archiv, Bd. XI.

[3] Wundt, Grundzüge der psychologischen Physiologie Bd. II, S. 330.

[4] v. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. XXXII, Heft 1.

„kleinste Differenz“ für Reize mit sehr starken Lichtern ca. $^1/_{160}$ sec. Die Verschmelzungsfrequenz elektrischer intermittierender Reize ist nach Cords nicht nachweisbar verschieden von der bei Lichtreizung unter analogen Bedingungen gefundenen; sie liegt ebenfalls bei ca. 160 Reizen pr. sec. Nach den weiter zurückliegenden Versuchen von Exner[1] und Filehne[2] beginnt bei elektrischen Reizen die Lichterscheinung schon bei 60 bis 70 Reizen pr. sec. kontinuierlich zu werden.

Bei Reizung verschiedener Netzhautstellen sind die Ergebnisse nach Exner[3] in erster Linie davon abhängig, ob eine Bewegung gesehen wird oder nicht. Die erhaltenen Werte sind nur in geringer Weise davon abhängig, welche Stellen der Netzhaut getroffen werden. Die Größe der Netzhautbilder und ihre Entfernung auf der Netzhaut ist nicht von Bedeutung. Die absoluten Werte betragen bei gesehener Bewegung für die fovea centralis 0,015 sec., für die Peripherie 0,017 sec. Bei Ausschluß einer Scheinbewegung für die fovea centralis 0,044 sec., für die Netzhautperipherie 0,049 sec. Charpentier[4] und Bourdon[4], die den Einfluß einer Scheinbewegung außer Acht lassen, geben folgende Werte an: Charpentier 0,027 sec., Bourdon 0,020—0,057 sec. Fällt ein Reiz in die fovea centralis, der andere auf die Netzhautperipherie, so beträgt nach Exner die kleinste Differenz 0,070 sec. Fällt je ein Reiz in die fovea centralis je eines Auges, so beträgt sie 0,017 sec. bei Scheinbewegung.

Für den Gehörsinn gibt Exner[5] folgende Werte an: Für dieselben empfindenden Elemente beträgt die kleinste Differenz 0,002 sec. Für verschiedene Elemente

[1] Pflügers Arch. Bd. XI, S. 406.
[2] v. Graefes Arch. Bd. XXXI, Heft 2, S. 1.
[3] Pflügers Arch. Bd. XI.
[4] B. Bourdon, La perception visuelle de l'espace S. 190.
[5] Pflügers Arch. Bd. XI.

desselben Ohres ist sie nur wenig kleiner als 0,1 sec., zwischen zwei gleichen Eindrücken beider Ohren beträgt sie 0,064 sec.

Für den Tastsinn gibt Valentin[1] 0,002 sec. als kleinste Differenz an, während Preyer[2] viel höhere Werte zu verzeichnen hat: 0,036 sec. und 0,027 sec.

Gehören beide Eindrücke verschiedenen Sinnesgebieten an, so zeigt die „kleinste Differenz" weit höhere Werte. Ihre Größe ist ferner abhängig von der Reihenfolge der Reize. Exner[3] gibt folgende Werte an:

voran	nach	
Gesichtseindruck	Tasteindruck	0,071 sec.
Tasteindruck	Gesichtseindruck	0,053 sec.
Gesichtseindruck	Gehörseindruck	0,160 sec.
Gehörseindruck	Gesichtseindruck	0,060 sec.

Eine zweite Frage aus diesem Gebiet bezieht sich auf die Beurteilung des Phasenverhältnisses periodischer Reize. Der einfachste Versuch dieser Art ist der Webersche Taschenuhrversuch: wenn man zwei Taschenuhren vor ein Ohr hält, kann man leicht unterscheiden, ob sie gleichzeitig oder ungleichzeitig ticken; hält man aber jede vor ein Ohr, so kann man das nicht. Für die übrigen Sinne liegen ähnliche Untersuchungen nicht vor. Ich folgte deshalb gerne der Aufforderung, die Herr Geheimrat Professor Dr. von Kries an mich richtete, entsprechende Versuche für den Gesichtssinn anzustellen.

Meine erste Versuchsgruppe bezieht sich auf das Erkennungsvermögen des Phasenverhältnisses von zwei parallelen periodischen Bewegungen; meine zweite Versuchsreihe auf die Erkennungsmöglichkeit der zeitlichen

[1] Arch. für physiolg. Heilkunde 1852.

[2] Preyer, Grenzen des Empfindungsvermögens und des Willens.

[3] Pflügers Arch. Bd. XI, S. 428.

Verhältnisse zweier periodisch auftretender Reize. Zu den ersten Untersuchungen benötigte ich eine Apparatur, die mir gestattete, zwei Beobachtungsobjekte in parallele auf- und abgehende Bewegung zu versetzen; ferner mußte

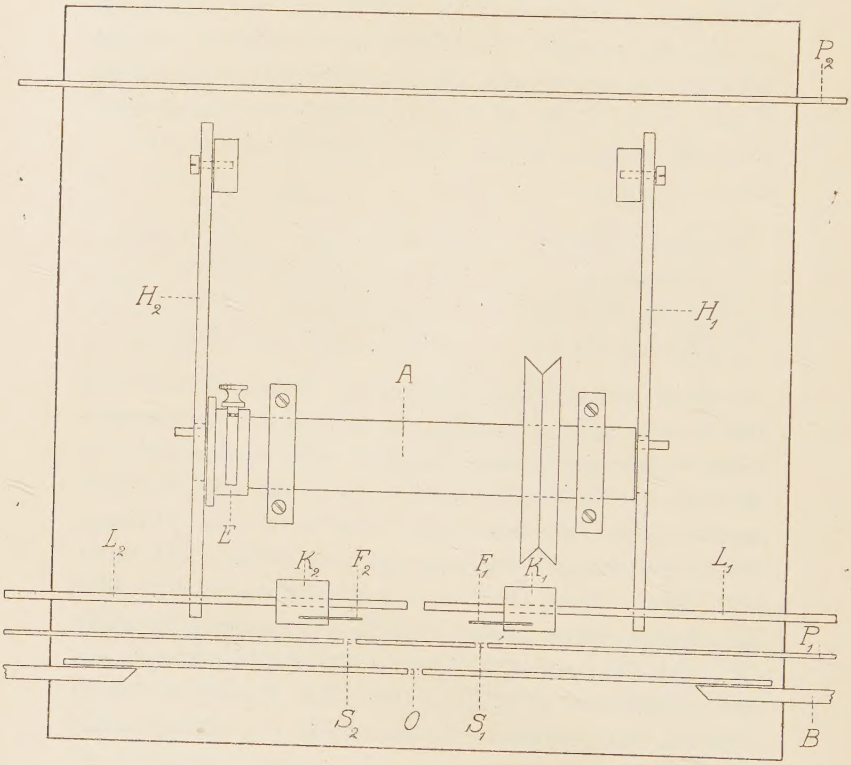

Fig. 1.

die Aufstellung mir erlauben, den Schwingungen der Beobachtungsobjekte die Phasendifferenzen 0 und π zu geben. Um dies zu erreichen, konstruierte ich mir folgende Versuchsanordnung:

Eine horizontale drehbare Achse A (Fig. 1 und Fig. 2) trägt an ihren Enden eine Exzentervorrichtung,

durch die zwei wagerechte, gleichlange einarmige Hebel H_1 und H_2 in eine periodisch auf- und abgehende Bewegung versetzt werden. Die beiden Hebel können erstens in gleicher Phase, zweitens mit einer Phasendifferenz von π schwingen. Dies wird ermöglicht durch folgende Einrichtung der Exzenter. Die dem Hebel H_1 zugewandte Stirnfläche der Achse trägt einen exzentrisch und zu ihrer Fläche senkrecht fest angebrachten Führungsstift, der in einer Leitfuge des Hebels gleitet. Am anderen Ende der Achse sitzt der Führungsstift für den Hebel H_2 nicht der Stirnfläche der Achse selbst auf, sondern er ist auf einer Kapsel E befestigt, die die Achse umfaßt, gegen sie um 180° drehbar ist und in ihren Endstellungen fixiert werden kann. Die freien Enden des Hebels tragen senkrecht zu ihrer Richtung die Leitschienen L_1 und L_2, auf denen je ein kleiner Korkschlitten K_1 und K_2 horizontal verschoben werden kann. Jeder Korkschlitten trägt eine vertikale ca. 2 cm lange Nadel, an deren oberem Ende ein schwarzes Papierstreifchen F_1 und F_2 von 2 mm Breite und 15 mm Länge derart befestigt ist, daß seine Längsrichtung horizontal und parallel der Achse, seine Fläche vertikal steht. Die Apparatur ist symmetrisch gebaut, so daß die Amplitude beiderseits gleich ist. Sie beträgt 1,5 cm. Diese Bewegungsvorrichtung ist verdeckt durch einen grauen auswechselbaren Karton P_1, der in der Mitte zwei nebeneinanderstehende gleiche vertikale Schlitze S_1 und S_2 von 2 mm Breite und 20 mm Höhe hat. Die benachbarten Kanten haben auf den verschiedenen Schirmen den Abstand 1, 2, 3, 6, 10 oder 20 cm. Möglichst nahe hinter je einem dieser Schlitze schwingt eines der eben beschriebenen schwarzen Papierfähnchen auf und ab. Die gegenseitige Entfernung der Papierstreifchen ist durch Verschieben der Korkschlitten so gewählt, daß einem vor dem Karton sich befindenden Beobachter nur ein schwarzes Quadrat von 2 mm Seitenlänge, nicht

aber die das Papierstreifchen tragende Vorrichtung sichtbar ist. In halber Höhe der Schlitze und in der Mitte zwischen ihnen liegt ein Fixationspunkt. Hinter der eben beschriebenen Aufstellung steht ein grauer Karton P_2, dessen Farbe so gewählt ist, daß seine von vorne her durch die Schlitze sichtbaren Teile im Ton mit dem vorderen grauen Schirm genau übereinstimmen. Auf diese Weise ist es erreicht, daß zwei gleich große quadratische Objekte von 2 mm Seitenlänge in einem gleichmäßig getönten grauen Felde auf und ab schwingen; ferner daß diese beiden Objekte einmal in gleicher Phase, ein andermal mit einer Phasendifferenz von π schwingen können.

An dieser Stelle möchte ich kurz eine erste, später verworfene Versuchsanordnung erwähnen. Sie unterschied sich von der eben beschriebenen in folgenden Punkten: Als Beobachtungsobjekte waren zwei runde weiße Papierscheibchen gewählt von 2 mm Durchmesser, die an der Spitze der eben beschriebenen Nadeln befestigt waren. An der Stelle des vorderen grauen Schirmes P_1 befand sich ein schwarzer Karton, der einen viereckigen Ausschnitt hatte. In dieser Öffnung wurden die beiden weißen Beobachtungsobjekte und die diese tragenden Nadeln sichtbar. Den Hintergrund bildete ein schwarzer Karton. Die beiden Nadeln waren schwarz gefärbt und gegen den schwarzen Hintergrund kaum zu sehen. Der Nachteil dieser Anordnung bestand vor allem darin, daß die schwingenden weißen Beobachtungsobjekte zu starke Nachbilder hinterließen, so daß ihre Bewegung bald zu einer gleichmäßig gefärbten hellgrauen Linie verschmolz. Außerdem wurde das Unterscheidungsvermögen dadurch in gewissem Grade beeinflußt, daß die beiden Nadeln stets, wenn auch nur in geringem Maße sichtbar blieben und vor allem durch seitliche Schwingungen der Beobachtungsobjekte, die, je nachdem ob die Objekte in gleicher oder in entgegen-

gesetzter Phase schwangen, einen anderen Charakter hatten und einen Anhaltspunkt zur Beurteilung des Phasenverhältnisses abgaben. Diese Nachteile waren bei der definitiven Aufstellung vermieden; einmal durch die Wahl von schwarzen Beobachtungsobjekten und eines grauen Hintergrundes, dann vor allem durch Einführen des vorderen grauen Kartons P_1 mit den beiden Schlitzen, wodurch sowohl die die Fähnchen tragenden Nadeln wie seitliche Schwingungen der Objekte verdeckt wurden.

Vor dem vorderen grauen Karton P_1 befindet sich ein schwarzer Schirm B, der in der Höhe der Schlitze einen zweiteiligen Schieberverschluß trägt. Wenn der Verschluß geschlossen ist, lassen die beiden Schieber eine Lücke O zwischen sich frei, durch die nur der Fixationspunkt sichtbar bleibt. Durch Druck auf einen Hebel öffnet sich der Verschluß durch Federkraft symmetrisch nach beiden Seiten in der Weise, daß die beiden Beobachtungsobjekte genau zu gleicher Zeit sichtbar werden. Der Abstand des beobachtenden Auges von den Objekten beträgt 30 cm. Ein genaues Einhalten der richtigen Entfernung ist durch Anbringen eines Stativs gesichert, das eine Stütze für Kinn und Stirn besitzt.

Die Achse wird durch einen kleinen Elektromotor mit Zentrifugalregulator in Bewegung versetzt. Durch Anwendung größerer oder kleinerer Übertragung zwischen Motor und Achse kann die Geschwindigkeit variiert werden, so daß die Schwingungszahlen 1, 2,5 4, 5, 6,5, 9, 12, 15 oder 18 pr. sec. resultieren. Die Schwingungszahl der Objekte wird mit Hilfe der elektromagnetischen Methode auf eine rotierende berußte Trommel aufgezeichnet. Der Stromschluß erfolgt einmal bei jeder Schwingung durch Eintauchen einer Kupfernadel C in ein mit Quecksilber gefülltes Näpfchen Q (Fig. 2). Die Zeitintervalle von je 1 sec. werden auf derselben Trommel markiert. Für die einzelnen Versuchsgruppen mußte die

Apparatur eine Veränderung des Abstandes der schwingenden Objekte erlauben. Zu diesem Zwecke wurde der Schirm P_1 durch den entsprechenden ersetzt. Durch Verschieben der Korkschlitten wurde die fassende Einstellung der schwarzen Papierstreifchen bewerkstelligt. Die Apparatur ist auf einem Tische so aufgestellt, daß sie durch ein gegenüberliegendes Fenster diffus beleuchtet wird. Um Schwankungen in der Intensität der Beleuchtung nach Möglichkeit auszuschließen, wurden die einzelnen

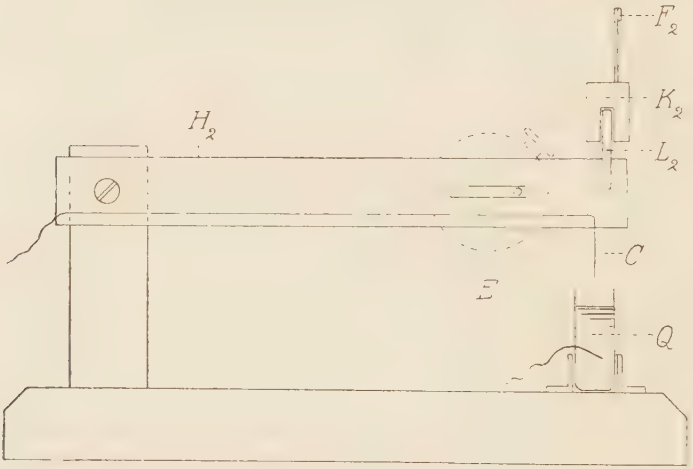

Fig. 2.

Versuchsreihen stets zu gleicher Stunde und nur bei unbedecktem Himmel gewonnen. Verschiedene Parallelversuche bei weniger guter Beleuchtung zeigten, daß die Resultate durch geringe Schwankungen in der Intensität der Beleuchtung nicht beeinflußt wurden. Der Beobachter dreht dem Fenster den Rücken.

Bei den Versuchen ging ich so zu Werke, daß ich zunächst bei gleichbleibendem Objektabstande die Schwingungszahl änderte und zwar in der Weise, daß ich von einer Umdrehungszahl ausgehend, bei der noch

mit größter Sicherheit die Art der Bewegung erkannt wurde, aufstieg bis zu einem Wert, bei dem keine Unterscheidung des Phasenverhältnisses mehr möglich war. Bei jeder in Betracht kommenden Schwingungszahl wurden je 20 Beobachtungen ausgeführt. Dann erst wurde ein anderer Objektabstand gewählt und wieder bei den verschiedenen Schwingungszahlen Beobachtungen gemacht. Es wurde bei allen Versuchen auf strengste Fixation geachtet, da sich schon bei den ersten Orientierungsversuchen eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Augenbewegungen gezeigt hatte. Um Fehler, die durch Schwankungen in der Intensität der Beleuchtung hätten entstehen können, nach Möglichkeit auszuschließen, wurden fast alle Versuche an einem zweiten und dritten Tage wiederholt. Die Übereinstimmung der zu den verschiedenen Zeiten gewonnenen Werte ist besonders für kleine und mittlere Objektabstände eine sehr gute. Außer von mir wurden alle Versuche noch von einer zweiten Versuchsperson ausgeführt, die wie ich selbst über volle Sehschärfe verfügte. Sämtliche Beobachtungen sind binocular mit helladaptiertem Auge gemacht.

Ehe ich an die Erläuterung der Tabellen gehe, möchte ich kurz schildern, in welcher Weise die einzelnen Versuche ausgeführt wurden: Der Beobachter fixiert den durch die Lücke des Schieberverschlusses sichtbaren Fixationspunkt. Sobald der Motor seine konstante Geschwindigkeit erreicht hat, wird der Verschluß durch eine zweite Person ausgelöst. Bei strengster Fixation sucht jetzt der Beobachter anzugeben, ob die Objekte in gleicher oder in entgegengesetzter Phase schwingen. Nach 3 sec. werden die Schieber wieder durch dieselbe Person geschlossen. Das Beobachtungsergebnis wird aufgezeichnet. In dieser Weise werden von jeder Versuchsperson bei gleichbleibendem Objektabstand und Schwingungszahl 20 Versuche hintereinander ausgeführt, bei welchen 10 mal ohne Wissen des Beobachters in be-

liebiger Reihenfolge vor Öffnen des Verschlusses das Phasenverhältnis gewechselt wird. Die Ergebnisse habe ich in den Tabellen I bis III übersichtlich zu ordnen versucht.

Erklärung der Tabelle I.

Die auf der Abscisse und Ordinate angegebenen Zahlen sind durch die eingezeichneten kurzen Erklärungen leicht verständlich. In der Kolonne A sind mit den Buchstaben M und P die Beobachter (ein Laboratoriumsdiener und ich selbst) bezeichnet. Diesen Buchstaben gegenüber stehen in Kolonne B die zugehörenden Beobachtungsergebnisse, und zwar gibt jede Zahl an, wie viel Fehler in einer Reihe von 20 Versuchen gemacht wurden. Ein (?) bedeutet, daß keine Entscheidung getroffen werden konnte. Wenn mehrere Werte angegeben sind, so beziehen sich diese auf an verschiedenen Tagen ausgeführte Versuchsreihen. Das arithmetische Mittel der zu einer Versuchsperson gehörenden Werte habe ich in einer weiteren Kolonne C der leichteren Übersicht wegen angegeben.

Wie aus der Tabelle ersichtlich, wurde bei 1 cm Objektabstand und 9 Schwingungen pr. sec. von beiden Beobachtern das Phasenverhältnis jedesmal richtig erkannt und zwar mit dem größten persönlichen Sicherheitsgefühl. Die Entscheidung fiel im ersten Augenblick nach Öffnen des Verschlusses. Bei dem gleichen Objektabstand und 12 Schwingungen pr. sec. machte sich ein ziemlich großes subjektives Unsicherheitsgefühl bemerkbar; entsprechend wurden 4—5 falsche Angaben gemacht. Die Entscheidung fiel meist erst am Ende der zur Beurteilung gelassenen Zeit. Bei 15 Schwingungen pr. sec. und dem gleichen Objektabstand konnte kein Unterschied in der Bewegung mehr erkannt werden. Beide Beobachter hatten auch dann, wenn sich die Objekte in entgegengesetzter Phase bewegten den Eindruck einer wenn auch undeutlichen, so doch stets gleichgerichteten

Tabelle I.

Schwingungszahl in einer Sekunde	Objektabstand in cm. (Gesichtswinkel.)																	
	1 (∢ 1° 54′ 36″)			2 (∢ 3° 49′ 6″)			3 (∢ 5° 43′ 30″)			6 (∢ 11° 25′ 16″)			10 (∢ 18° 55′ 30″)			20 (∢ 36° 52′ 2″)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
9	M	0 0	0	M	0 0	0	M	0 0	0							M	4 2	3
	P	0 0	0	P	0 0	0	P	0 0	0							P	0 0	0
12	M	5 4	4,5	M	2 3	2,5	M	1 2	1,5	M	0 0	0	M	0 0	0	M	9 6	7,5
	P	4 5*	4,5	P	1 0	0,5	P	0 0	0	P	0 0	0	P	0 0	0	P	6 4	5,0
15	M	? ?	?	M	? ?	?	M	? ?	?	M	? ?	?	M	3 4	3,5			
	P	? ?	?	P	? ?	?	P	? ?	?	P	? ?	?	P	4 4**	4			

Bewegung. Mit der Vergrößerung des Objektabstandes nahm das Sicherheitsgefühl bei Beurteilung des Phasenverhältnisses zu. Die Fehler nahmen ab. Bei 3 cm Objektabstand und 12 Schwingungen pr. sec. waren zum erstenmal bei dieser Schwingungszahl alle Angaben des Beobachters P richtig. Bei 6 cm Objektabstand und der gleichen Schwingungszahl hatte auch der Beobachter M keine Fehler mehr zu verzeichnen. Mit einem Objektabstand von 10 cm war ein Optimum erreicht. Selbst bei 15 Schwingungen pr. sec. konnten bei diesem Objektabstand die meisten Versuche richtig erkannt werden, während bei der gleichen Schwingungszahl und kleineren Objektabständen überhaupt kein Unterschied in der Bewegung gesehen werden konnte. Wurde der Objektabstand noch weiter vergrößert, so nahm das Unterscheidungsvermögen rapide ab.

Fassen wir die Ergebnisse zusammen, so sehen wir, daß das Erkennungsvermögen für die vorliegenden Bewegungsarten bei gleichbleibender Schwingungszahl mit dem Gesichtswinkel wächst und ein Optimum erreicht bei einem Gesichtswinkel von ca. 19^0 (10 cm Objektabstand $= 18^0\ 55'\ 30''$). Bei größerem Gesichtswinkel nimmt das Erkennungsvermögen wieder ab.

Bei den eben geschilderten Versuchen wurde meine Aufmerksamkeit auf folgende interessante Erscheinung gelenkt[1]: Es fiel mir auf, daß an der Grenze der Unterscheidundsmöglichkeit bei Objektabständen von 1 cm und 2 cm alle gemachten Fehler sich darauf bezogen, daß die entgegengesetzt gerichtete Bewegung für gleichgerichtet gehalten worden war, während die gleichgerichtete Bewegung stets richtig erkannt wurde; umgekehrt, daß bei 10 cm Objektabstand alle Fehler sich darauf bezogen, daß die gleichgerichtete Bewegung für eine entgegengesetzt gerichtete gehalten worden war, während die ent-

[1] siehe hierzu Tabelle II.

Tabelle II.

\+ = richtig beurteilt
— = falsch beurteilt

Phasendifferenz π *	Phasendifferenz 0	Urteil	Phasendifferenz π **	Phasendifferenz 0	Urteil
	•	+		•	—
•		—		•	+
•		+	•		+
	•	+		•	—
	•	+		•	+
•		+		•	+
•		—	•		+
•		—	•		+
	•	+		•	+
•		—	•		+
•		+		•	—
	•	+		•	—
	•	+		•	+
•		+	•		+
	•	+	•		+
	•	+	•		+
	•	+		•	+
•		+	•		+
•		—	•		+
	•	+	•		+

Ausgeführte Versuchsreihe der in Tabelle I mit denselben Zeichen versehenen Angaben.

gegengesetzt gerichtete Bewegung jedesmal richtig erkannt wurde. Bei näherer Prüfung auch anderer Objektabstände auf diese Erscheinung ergab sich folgendes: Bei Gesichtswinkeln von ca. 4° an abwärts war an der Grenze

der Unterscheidungsmöglichkeit bei entgegengesetzter Phase scheinbar eine Abnahme der Phasendifferenz festzustellen, so daß endlich die entgegengesetzt gerichtete Bewegung von der gleichgerichteten nicht mehr unterschieden werden konnte. Genau die entgegengesetzte Erscheinung zeigte sich bei Gesichtswinkeln von ca. 11° an aufwärts und zwar in weit deutlicherer Weise. Nicht nur an der Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit, sondern schon bei relativ kleinen Schwingungszahlen hatte man den Eindruck, daß die in gleicher Phase sich bewegenden Objekte eine gewisse Phasendifferenz zeigten. Mit steigender Schwingungszahl nahm diese scheinbare Phasendifferenz zu. Bei einem Gesichtswinkel von ca. 37° konnte eine rein gleichphasige Bewegung schon bei 9 Schwingungen pr. sec. nicht mehr gesehen werden; ich hatte den Eindruck des Nachhinkens eines Beobachtungsobjekts. Die Entscheidung ob gleiche, ob entgegengesetzte Phase, wurde unwillkürlich aus dem Vergleiche der Phasendifferenzen gewonnen. Man wußte, daß der kleineren Phasendifferenz die gleichphasige Bewegung entsprach. Eine Erklärung für diese Erscheinung kann wohl zur Zeit noch nicht gegeben werden.

Während bei den vorhergehenden Versuchen der gegenseitige Abstand der Beobachtungsobjekte verändert wurde, der Fixationspunkt aber stets in der Mitte zwischen den Objekten lag, habe ich bei den folgenden Versuchen den Objektabstand nicht verändert, dagegen den Fixationspunkt horizontal oder vertikal verschoben, weil es interessant erschien, das Verhalten zentraler und peripherer Netzhautteile unter denselben Bedingungen vergleichend zu prüfen. Der Objektabstand betrug bei den folgenden Versuchen 1 cm. Der Fixationspunkt wurde zunächst von seiner früheren Lage aus 5 cm, bei weiteren Versuchen 10 cm seitlich horizontal verschoben. Bei einer dritten Versuchsgruppe wurde er 10 cm vertikal nach unten verlegt. Der Schieberverschluß wurde so

modifiziert, daß der Fixationspunkt stets sichtbar blieb. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in Tabelle III aufgezeichnet.

Tabelle III.

Schwingungszahl in einer Sekunde	Objektabstand 1 cm. Lage des Fixationspunktes: zwischen den Objekten			5 cm rechts seitlich			10 cm rechts seitlich			10 cm unterhalb		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
9	M	0 0	0									
	P	0 0	0									
12	M	5 4	4,5	M	0 0	0	M	0 0	0	M	1 0	0,5
	P	4 5	4,5	P	0 0	0	P	0 0	0	P	0 0	0
15	M	? ?	?	M	3 5	4	M	6 4	5	M	9 4	6,5
	P	? ?	?	P	2 3	2,5	P	2 1	1,5	P	4 5	4,5
18							M	4 ?		M	9 7	8
							P	3 ?		P	8 9	8,5

Erklärung der Tabelle III.

Die Anlage dieser Talle entspricht in allgemeinen derjenigen von Tabelle I, jedoch mit dem Unterschied, daß über den großen Kolonnen die Lage des Fixations-

punktes angegeben ist. In die erste Kolonne habe ich der leichteren Übersicht wegen die bei dem Objektabstand und zentraler Lage des Fixationspunktes gefundenen Werte eingetragen. Wie aus den aufgezeichneten Werten ersichtlich ist, liegt die Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit bei nach unten oder seitlich verlegtem Fixationspunkt beträchtlich höher wie bei zentraler Lage des Fixationspunktes. Noch bei 12 Schwingungen pr. sec. konnte mit größtem persönlichen Sicherheitsgefühl jedesmal die Phase richtig erkannt werden. Selbst bei 15 Schwingungen pr. sec. war es noch möglich, wenn auch mit einem gewissen Unsicherheitsgefühl, die Phase meistens richtig zu erkennen. Für die Ergebnisse war es ziemlich gleichgültig, ob der Fixationspunkt 5 cm oder 10 cm seitlich verschoben war. Die Verlegung 10 cm vertikal nach unten schien etwas bessere Werte zu ergeben.

Bei diesen Versuchen zeigte sich ebenfalls die eigentümliche Erscheinung, daß von einer bestimmten Schwingungszahl an, nahe der Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit, bei der gleichphasigen Bewegung eine gewisse Phasendifferenz gesehen wurde, während die entgegengesetzte Bewegung bis zur Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit stets gut als solche erkannt wurde. Es handelt sich also um dieselbe Erscheinung, die ich vorhin beschrieb für größere Objektabstände und zentraler Lage des Fixationspunktes.

Das Prinzip der zweiten Versuchsreihe war dieses. Die Einwirkung zweier leuchtender Punkte auf den Gesichtssinn soll periodisch in der Weise unterbrochen werden, daß Einwirkungszeit und Unterbrechungszeit gleich lange dauern. Ferner sollen die Unterbrechungen der beiden Lichtreize willkürlich gleichzeitig oder alternierend erfolgen. Diesen Anforderungen genügte folgende zu diesem Zwecke zusammengestellte Apparatur: Auf

einer Mattscheibe werden mit Hilfe zweier identischer Linsen die reellen Bilder von zwei kleinen erhellten quadratischen Flächen entworfen. Möglichst nahe den Objektiven, zwischen diesen und den erhellten Quadraten ist eine Vorrichtung in den Strahlengang eingeschaltet, welche gestattet, die durch die Linsen entworfenen Bilder der erhellten Quadrate periodisch gleichzeitig oder alternierend erscheinen zu lassen. Zwischen der Mattscheibe und den Objektiven liegt ein Sektorenverschluß. Im folgenden soll an Hand der Fig. 3—5 die Konstruktion der einzelnen Teile dieser Versuchsanordnung erläutert werden.

Zwei gleiche viereckige Hohlprismen aus Blech P_1 und P_2, die auf einer Holzschiene H horizontal verschiebbar sind, tragen in der vorderen Wand in gleicher Höhe je eine quadratische Öffnung Ö, die mit einer Milchglasscheibe hinterlegt ist. Diese wird durch eine in der Blechhülse befindliche elektrische Lampe erleuchtet. Ungefähr ein Meter vor dieser Anordnung ist in der Höhe der Ausschnitte und parallel der Leitschiene H eine kleine Korkplatte K angebracht, in welche die beiden identischen Einzellinsen D_1 und D_2 eines symmetrischen Doppelprotars nebeneinander eingelassen sind. Die Verbindungslinie der Linsenmittelpunkte liegt horizontal und parallel der Leitschiene, die optischen Achsen liegen horizontal und senkrecht zur Richtung der Verbindungslinie. Auf der Korkplatte, der Leitschiene zugekehrt, ist ein dünner Karton T aufgeklebt, der vor jeder Objektivöffnung einen horizontalen Schlitz B_1 und B_2 (Blende) von 2mm Höhe und 10 mm Länge freiläßt. Die Mittelpunkte der Schlitze liegen auf den optischen Achsen. Jede Linse entwirft auf einer ca. 50 cm entfernten Mattscheibe M ein reelles Bild der quadratischen erleuchteten Ausschnitte. Die Größe der Quadrate ist so gewählt, daß ihre Bilder 9 qmm groß sind. Für kleinere gegenseitige Abstände

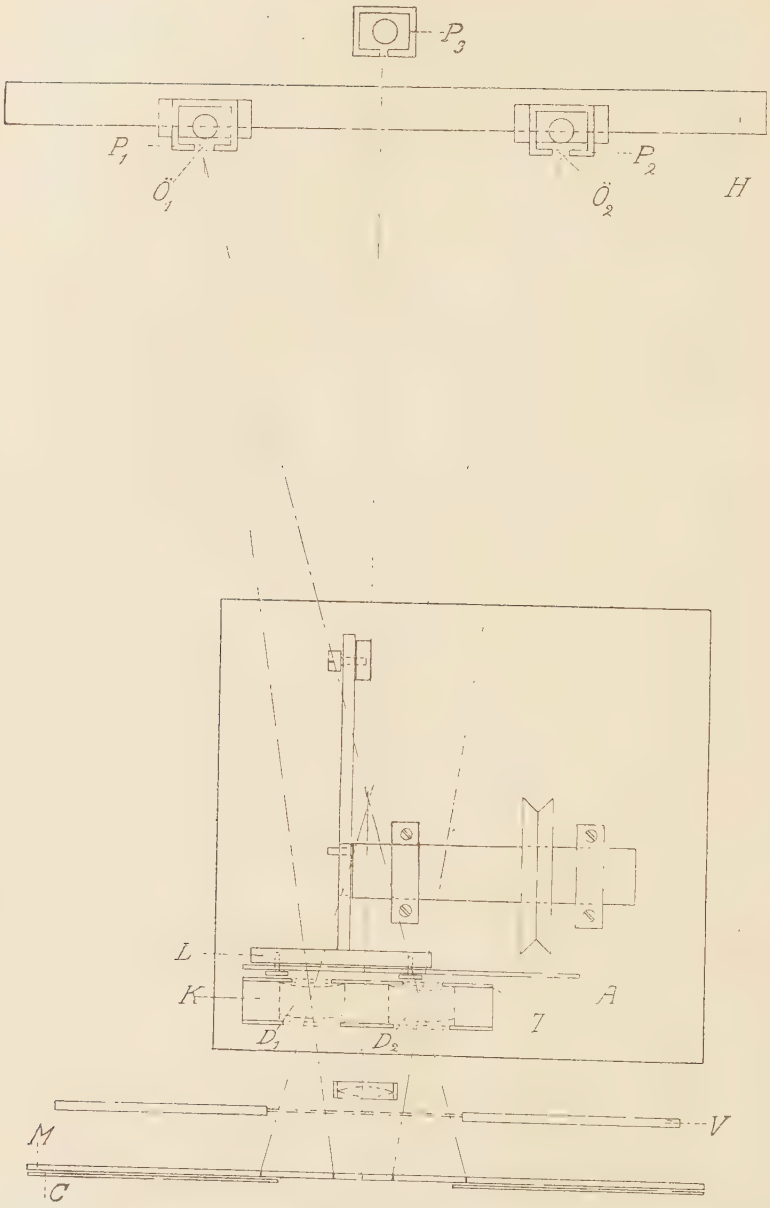

Fig. 3.

der Bilder werden die inneren, für größere Abstände die äußeren Bilder verwendet und die jedesmal nicht gewünschten durch einen vorgesetzten Karton C dem beobachtenden Auge verdeckt. Die weitere Regulierung des gegenseitigen Abstandes geschieht durch Verschieben der Blechhülsen auf der Leitschiene. Wenn der Bildabstand mehr wie 10 cm betrug, divergierten die Strahlen-

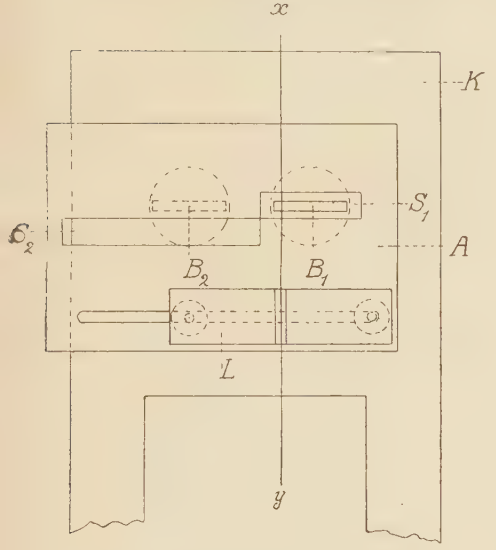

Fig. 4.
A = Aluminiumplättchen. S_1 S_2 = Ausschnitte. K = Korkplatte. L = Holzleiste. F_1 F_2 = Blende.

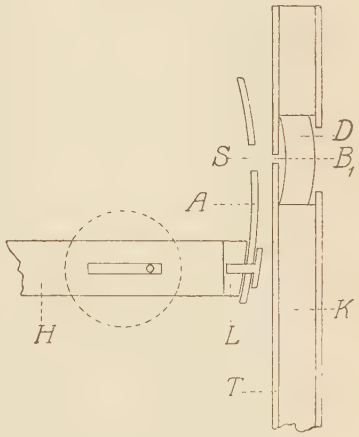

Fig. 5.
Schnitt x—y.

bündel so stark, daß die Helligkeit der Bilder abnahm. Durch je ein nahe der Mattscheibe in den Strahlengang eingeschaltetes achromatisches Prisma wurde die Divergenz der Strahlenbündel vermindert und die gleiche Helligkeit erzielt wie bei kleineren Abständen. Zwischen Korkscheibe und Leitschiene, dicht vor den ersteren, wird ein Aluminiumplättchen A auf und ab bewegt, das zwei rechteckige horizontale Ausschnitte S_1 und S_2 hat. Diese sind wie Fig. 4 zeigt, um ihre Länge und

Höhe gegeneinander verschoben. S_2 ist doppelt so lang wie S_1. Zur Bewegung des Aluminiumplättchens dient ein Hebel des schon in der ersten Versuchsanordnung beschriebenen kleinen Bewegungsapparates. Er trägt an seinem freien Ende senkrecht zu seiner Richtung eine Holzleiste L. Gegen diese ist das Aluminiumplättchen in seinen unteren Teilen horizontal verschiebbar befestigt. Die Aufstellung des kleinen Bewegungsapparates ist so gewählt, daß die den Ausschnitten gemeinsame horizontale Begrenzungslinie symmetrisch zu den optischen Achsen schwingt. Die horizontale Verschiebung des Aluminiumplättchen ermöglicht, daß in der einen Endstellung bei Bewegung des Hebels die vor den Objektiven liegende Blendenöffnungen dem Strahlengange alternierend, in der anderen Endstellung gleichzeitig geöffnet und verschlossen werden, wie aus Fig. 4 leicht ersichtlich. Das Verhältnis der Ausschnitthöhe zur Amphitude ist so gewählt, daß die Objektive während gleicher Zeiten dem Strahlengange geöffnet und verschlossen bleiben. Durch die geringe Höhe der Blendenausschnitte (2 mm) ist eine fast momentane Aufhellung und Verdunkelung der Bildchen erzielt. Zwischen Mattscheibe und Korkplatte ist ein Sebtorenverschluß V eingeschaltet In der Mitte zwischen den Bildchen der leuchtenden Quadrate liegt als Fixationspunkt das durch eine Linse entworfene Bildchen einer kleinen runden, durch die Lampe P_3 erleuchteten Öffnung. Damit der Fixationspunkt auch bei geschlossenem Sebtorenverschluß sichtbar bleibt, ist P_3 erhöht aufgestellt, so daß sich der Verschluß unterhalb des Strahlenganges befindet. Der Abstand des beobachtenden Auges von der Mattscheibe beträgt 30 cm. Ein genaues Einhalten der richtigen Entfernung ist durch Anbringen eines Stativs gesichert, das eine Stütze für Kinn und Stirn besitzt. Die Bewegung des das Aluminiumplättchen tragenden Hebels und die Markierung der Zeit geschieht in derselben

Weise wie bei der ersten Versuchsanordnung. Die Apparatur ist auf einem Tisch, einem Fenster gegenüber aufgestellt. Der Beobachter dreht dem Fenster den Rücken. Durch einen Vorhang wird die Beleuchtung so modifiziert, daß die Bildchen der erleuchteten Quadrate gut erkennbar sind.

Bei den Versuchen ging ich wieder so zu Werke, daß ich zunächst bei gleichbleibendem Bildabstand (unter Bildabstand ist die Entfernung der zugekehrten Begrenzungslinien der Bildchen verstanden) die Zahl des Aufleuchtens der Bilder pr. sec. änderte und zwar in der Weise, daß ich von einer Zahl ausgehend, bei welcher noch mit größter Sicherheit die zeitlichen Verhältnisse erkannt wurden, aufstieg bis zu einem Wert, bei dem keine Erkennung der zeitlichen Verhältnisse mehr möglich war. Bei jeder in Betracht kommenden Reizzahl wurden je 20 Beobachtungen ausgeführt. Dann erst wurde ein anderer Objektabstand gewählt und bei den verschiedenen Reizzahlen beobachtet. Auch diesmal wurde bei allen Versuchen auf strengste Fixation geachtet. Die Übereinstimmung der zu verschiedenen Zeiten gewonnenen Werte war wieder vor allem für kleine und mittlere Bildabstände eine sehr gute. Alle Beobachtungen wurden binocular mit helladaptiertem Auge ausgeführt. Die Versuchspersonen waren dieselben wie bei den vorhergehenden Versuchen. Der Gang der einzelnen Versuche ist der gleiche wie bei meiner ersten Versuchsgruppe. Auch die Tabellen sind ähnlich angelegt.

Erklärung der Tabelle IV.

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich, wurden bei 1 cm Bildabstand und 5 Reizen pr. sec. von beiden Beobachtern mit dem größten persönlichen Sicherheitsgefühl die zeitlichen Verhältnisse jedesmal richtig erkannt. Im ersten Augenblick nach Öffnen des Verschlusses fiel die Entscheidung. Ich selbst (P) konnte auch noch bei 6,5

Reizen pr. sec. eine sichere Entscheidung treffen. Bei 9 Reizen pr. sec. und dem gleichen Abstand der Bildchen machte sich ein großes subjektives Unsicherheitsgefühl bemerkbar; entsprechend wurden 4 und 5 falsche Angaben gemacht. Bei 12 Reizen pr. sec. war eine Entscheidung nicht mehr zu treffen. Mit Vergrößerung des Bildabstandes nahm die Unterscheidungsmöglichkeit ab. Bei 2 cm Bildabstand lag die Grenze für beide Beobachter bei 5 Reizen pr. sec. Bei 3 cm Bildabstand und derselben Reizzahl gelang es dem Beobachter P noch, wenn auch mit einem gewissen Unsicherheitsgefühl, die zeitlichen Verhältnisse jedesmal richtig zu erkennen. Der Beobachter M hatte dagegen schon mehrere Fehler zu verzeichnen. Bei 6 cm und 10 cm Bildabstand lag die Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit bei 2,5 Reizen pr. sec. und bei 20 cm Bildabstand konnten selbst bei 2,5 Reizen pr. sec. die zeitlichen Verhältnisse nicht mehr erkannt werden. Mit der Vergrößerung des Bildabstandes nahm das subjektive Sicherheitsgefühl sehr schnell ab.

Weitere Versuche, bei welchen der Abstand der Bildchen kleiner als 1 cm gewählt wurde, ergaben folgende Werte: Bei 5 mm Bildabstand gelang es mir (P) noch bei 9 Reizen pr. sec. die zeitlichen Verhältnisse jedesmal richtig zu erkennen. Bei 2 mm Bildabstand und der gleichen Reizzahl hatte auch M keine Fehler mehr zu verzeichnen. Bei 1 mm Bildabstand lag die Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit erst bei 12 Reizen pr. sec. Die höchsten Werte wurden erreicht, wenn der Bildabstand nur einen Bruchteil eines Millimeters betrug; in diesem Falle konnten beide Beobachter selbst bei 15 Reizen pr. sec. die zeitlichen Verhältnisse jedesmal richtig erkennen.

Fassen wir die Ergebnisse zusammen, so sehen wir, daß die Unterscheidungsmöglichkeit bei gleichbleibender Reizzahl mit Abnahme des Gesichtswinkels wächst und ein Maximum erreicht bei einem Gesichtswinkel unter 10′.

Bei den eben beschriebenen Versuchen wurde meine Aufmerksamkeit auf folgende Erscheinung gelenkt. Der Bildabstand betrug 2 mm. Das Aluminiumplättchen war auf „alternierend“ eingestellt. Als jetzt der Motor bei geöffnetem Sebtorenverschluß anlief, hatte ich eine Zeitlang den Eindruck, daß sich nur ein Bildchen horizontal hin und her bewegte. Erst als der Motor eine größere Geschwindigkeit erreichte, erkannte ich zwei getrennte Bilder. Bei näherer Prüfung auch anderer Bildabstände auf diese Erscheinung fand sich folgendes: Das scheinbare Hin- und Herschwingen eines einzigen Bildchens wird bis zu einer um so größeren Reizzahl beobachtet, je kleiner der Bildabstand ist; und zwar wurde diese Erscheinung beobachtet

bei	1	mm	Bildabstand	bis	zu	9	Reizen	pr.	sec.
„	2	„	„	„	„	4	„	„	„
„	5	„	„	„	„	3	„	„	„
„	10	„	„	„	„	2	„	„	„
„	20	„	„	„	„	1	Reiz	„	„

Die gleiche Erscheinung wurde auch von anderen Versuchspersonen beobachtet. Ich möchte annehmen, daß die eben beschriebene Tatsache einen Anhaltspunkt für die Beurteilung der zeitlichen Verhältnisse abgibt und vielleicht die hohen Werte bei kleinen Bildabständen erklären hilft.

Um wieder das Verhalten zentraler und peripherer Netzhautpartien unter denselben Bedingungen vergleichen zu können, wurde bei den folgenden Versuchen der Fixationspunkt von seiner früheren Lage aus erst seitlich horizontal 5 cm und 10 cm, dann vertikal nach unten 10 cm verschoben. Der Bildabstand betrug bei allen Versuchen 1 cm. Die in Tabelle V geordneten Beobachtungsergebnisse zeigen, daß die Unterscheidungsmöglichkeit bei der Beobachtung mit peripheren Netzhautteilen, besonders bei größeren Schwingungszahlen,

etwas kleiner ist im Vergleich zu den analogen Beobachtungen mit zentralen Netzhautpartien. Auch das subjektive Sicherheitsgefühl ist geringer.

Tabelle V.

Reizzahl in einer Sekunde	Abstand der Reize 1 cm. Lage des Fixationspunktes: zwischen den Reizen			5 cm rechts seitlich			10 cm rechts seitlich			10 cm unterhalb		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
5	M	0 0	0	M	0 0	0	M	0 0?	0?	M	0? 0	0?
	P	0 0	0	P	0 0	0	P	0 0	0	P	0 0	0
6,5	M	3 1	2	M	1 2	1,5	M	6 5	5,5	M	4 4	4
	P	0 0	0	P	0 0	0	P	0 2	1	P	2 1	1,5
9	M	5 3	4	M	? ?	?	M	? ?	?	M	? ?	?
	P	8 3	5,5	P	5 7	6	P	8 9	8,5	P	9 8	8,5

Zusammenfassung der Ergebnisse.

Erste Versuchsreihe.

1. Die Unterscheidungsmöglichkeit für die vorliegenden Bewegungsarten nimmt bei zentral gelegenem Fixationspunkte mit dem Gesichtswinkel zu bis zu einem optimalen Werte des Gesichtswinkels von ca. 19° (Objektabstand 10 cm). Bei weiterer Vergrößerung des Gesichtswinkels nimmt die Unterscheidungsmöglichkeit wieder ab.
2. Bei gleichem Gesichtswinkel von 1° 55′ (Objektabstand 1 cm) liegt die Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit für die Netzhautperipherie bei 15 Schwingungen pr. sec., für zentrale Netzhautteile bei 12 Schwingungen pr. sec.
3. Die peripheren Netzhautteile zeigen eine deutliche Bevorzugung für den Eindruck ungleichphasiger Bewegung, die zentralen scheinen den Eindruck gleichphasiger Bewegung zu bevorzugen.

Zweite Versuchsgruppe.

1. Das Unterscheidungsvermögen für das zeitliche Verhältnis der beiden periodischen Lichtreize nimmt bei zentral gelegenem Fixationspunkte mit zunehmendem Gesicktswinkel rasch ab.
2. Bei gleichem Gesichtswinkel von 1° 55′ (Bildabstand 1 cm) liegt die Grenze der Unterscheidungsmöglichkeit sowohl für die zentralen, wie für periphere Netzhautteile bei 5 Reizen pr. sec.
3. Bei Gesichtswinkeln unter 3° 50′ und einer Reizzahl, die unter einem oberen Grenzwert liegt, glaubte man anstelle der alternierend erscheinenden Bilder nur eines zu sehen, das horizontal hin und her schwingt. Der obere Grenzwert der Reizzahl ist um so größer, je kleiner der Gesichtswinkel ist.

Aus der zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse der beiden Versuchsreihen scheint sich ein berechtigter Einwurf gegen eine vielfach, in neuerer Zeit namentlich von Bethe[1] vertretene Theorie zu ergeben. Nach dieser Auffassung ist die Täuschung über die zeitlichen Verhältnisse zweier Lichtreize wesentlich dadurch bedingt, daß eine gewisse Zeit erforderlich ist, um die zunächst einer Stelle des Gesichtsfeldes zugewandte Aufmerksamkeit auf eine andere übergehen zu lassen, also durch die zeitliche Dauer des Aufmerksamkeitssprunges. Wäre dies der Fall, so müßte der Wechsel der Netzhautstellen wohl die Ergebnisse beider Versuchsreihen in dem gleichem Sinne beeinflussen. Dagegen scheint es mit jener Theorie schwer vereinbar, daß wie meine Beobachtungen ergeben, mit zunehmendem Gesichtswinkel die Grenzen der Unterscheidungsmöglichkeit sich in den beiden Versuchsgruppen nach der entgegengesetzten Richtung verschieben. Die Versuche scheinen mir eher darauf hinzuweisen, daß die an zwei verschiedenen Stellen ablaufenden Vorgänge sich zu einem einheitlichen und je nach dem Phasenverhältnis verschiedenen Eindruck vereinigen können. Wo und in welcher Weise dies geschehen mag, entzieht sich freilich vorderhand unserer Kenntnis.

Herrn Geheimrat Professor von Kries fühle ich mich für die Leitung der Arbeit, die vielfachen Belehrungen und das mir stets erwiesene Wohlwollen zu tiefem Danke verpflichtet.

Herrn Professor Dr. W. Trendelenburg möchte ich auch an dieser Stelle für seine Bemühungen danken.

[1] Pflügers Arch. Bd. CXXI. 1. S. 1.

Vita.

Ich, Friedrich Pauwels, wurde geboren zu Aachen am 23. Mai 1885 als Sohn des Fabrikbesitzers Charles Pauwels. Meine erste Vorbildung erhielt ich auf der Vorschule des Kaiser-Karls-Gymnasiums zu Aachen und auf diesem selbst. Ostern 1906 wurde ich mit dem Reifezeugnis entlassen und wandte mich dem Studium der Heilkunde zu. Die beiden ersten Studiensemester (S.-S. 1906, W.-S. 1906/07) verbrachte ich zu Lausanne, die folgenden (S.-S. 1907 bis S.-S. 1911) zu Freiburg i. Br. Hier bestand ich am 25. Februar 1909 die ärztliche Vorprüfung und beendete am 26. Mai 1911 das medizinische Staatsexamen. Zum Doktor der Medizin promovierte ich ebenfalls zu Freiburg i. Br. am 23. Juni 1911.

Reizzahl in einer Sekunde	Bi											
	> 0,1 (∢ 11′ 30″)			0,2 (∢ 22′ 56″)			0,5 (∢ 57′ 18″)			1 (∢ 1° 54′ 36″		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2,5												
4												
5										M P	0 0 0 0	0 0
6,5							M P	0 0 0 0	0 0	M P	3 1 0 0	2 0
9				M P	0 0 0 0	0 0	M P	2 2 0 1	2 0,5	M P	5 3 8 3	4 5,5
12	M P	0 0 0 0	0 0	M P	4 3 4 2	3,5 3						
15	M P	0 0 0 0	0 0									

nd in cm.
winkel.)

9′ 6″)	3 (∢ 5° 43′ 30″)			6 (∢ 11° 25′ 16″)			10 (∢ 18° 55′ 30″)			20 (∢ 36° 52′ 2″)		
C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
				M	0 0	0	M	0 0	0	M	? ?	?
				P	0 0	0	P	0 0	0	P	5 6	5,5
	M	0 0	0	M	4 9	6,5	M	7 8	7,5			
	P	0 0	0	P	1 1	1	P	5 3	4			
0	M	4 3	3,5	M	9 5	7	M	? ?	?			
0	P	0 0	0	P	2 3	2,5	P	7 9	8			
5	M	6 5	5,5	M	? ?	?						
1,5	P	4 4	4	P	7 9	8						
8,5 7,5												